



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
AGRÓNOMOS



UTILIZACIÓN DE UN SECADERO SOLAR EN EL PROCESO DE
DESHIDRATACIÓN DE ZANAHORIA (*Daucus Carota L.*)



ESTUDIANTE: HEIDI TATIANA JIMÉNEZ ARIZA

TUTORES: CONSTANTINO VALERO UBIERNA

BELEN DIEZMA IGLESIAS

MÁSTER EN AGROINGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA RURAL

Madrid - 2010

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo pertenece al ingenio, dedicación y cooperación de todo el Departamento de Ingeniería Rural, de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Pero hay personas que con su voluntad y colaboración han permitido completar este proyecto:

Belén Diezma Iglesias, la batuta de este proyecto, fue un placer trabajar junto a ti.

Constantino Valero, con tu colaboración y diligencia en cada una de las necesidades e imprevistos.

Margarita Ruiz-Altisent, por su apoyo.

Pilar Barreiro, Tu imaginación y amor a la investigación, me sorprenden cada día, eres un ejemplo de motivación profesional.

Eva Cristina Correa, generación de trabajo e ideas.

Javier García-Hierro, siempre con prontitud atendiste mis llamadas y preguntas.

Teresa, Rosa, Sandra y Miguel compañeros del máster, siempre una sonrisa y una palabra de aliento, gracias por compartir este tiempo conmigo.

Eva, Ricardo, Blanca, Adolfo, Ángela, Ana; pequeños momentos, grandes recuerdos.

Miguel Ángel, gracias por permitirme pertenecer a tu vida, hemos cumplido nuestro sueño, luchar a tu lado es mi felicidad.

A mi familia, por permitirme separarme de sus vidas para cumplir mis sueños, pero sepan que mis logros son solo resultado de su amor y apoyo.

A ti Dios, que en los momentos, cuando creo que las cosas son imposibles, en un segundo las haces posibles.

UTILIZACIÓN DE UN SECADERO SOLAR EN EL PROCESO DE DESHIDRATACIÓN DE ZANAHORIA (*Daucus Carota L.*)

Se pretendió supervisar el comportamiento del aire caliente dentro de una cámara de secado, resultado del calentamiento del aire entrante del medio ambiente por efecto de la radiación solar, utilizando sensores de temperatura ubicados de forma distribuida en la cámara de secado y en su exterior.

Luego se realizó un proceso de secado de zanahoria en láminas, supervisado mediante sensores de temperatura y humedad relativa, evaluando el comportamiento del aire caliente en el interior del secadero solar.

Las variables del producto: rendimiento, contenido de humedad inicial y final, influencia de la forma del producto y su presentación, así como la distribución en el secadero y características organolépticas del producto, se evaluaron para el proceso de secado. La evolución temporal de estas variables monitorizadas a través del sistema de supervisión y control permite optimizar la utilización eficiente del aire caliente, para así facilitar la penetración del calor al interior del producto y realizar la extracción del agua de composición del alimento; ya que esta se realiza desde el interior a la superficie.

Los datos obtenidos del proceso permitirán en futuros procesos establecer un modelo de secado óptimo para la zanahoria en los secaderos y generar recomendaciones para la formulación de métodos de control automático para los secaderos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Palabras clave: fruta procesada, control automático, supervisión de procesos.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| LISTA DE TABLAS..... | 3 |
| LISTA DE FIGURAS | 4 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| 1.1 Antecedentes | 5 |
| 1.2 Justificación del proyecto | 5 |
| 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA..... | 6 |
| 2.1 Proceso de Secado..... | 6 |
| 2.2 Zanahoria Deshidratada | 9 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS | 11 |
| 3.1 Equipo | 11 |
| 3.2 Sensores | 13 |
| 3.2.1 Tarjetas TurboTag ® | 13 |
| 3.2.2 Sensirion TM | 16 |
| 3.2.3 Montaje de los sensores..... | 17 |
| 3.3 Material | 19 |
| 3.4 Proceso | 21 |
| 3.4.1 Caracterización de Secaderos | 21 |
| 3.4.2 Secado de zanahoria..... | 22 |
| 3.5 Análisis de datos | 23 |
| 4. RESULTADOS | 24 |
| 4.1 Caracterización de secadero | 24 |
| 4.1.1 Ensayo Ventilador Apagado | 24 |
| 4.1.2 Ensayo Ventilador Encendido | 27 |
| 4.2 Proceso de secado | 31 |
| 4.2.1 Tarjetas TurboTag® | 31 |
| 4.3 Producto | 36 |
| CONCLUSIONES..... | 39 |
| RECOMENDACIONES | 40 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 41 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 1. Características TurboTag ®, T702-B</i> | 16 |
| <i>Tabla 2. Características Sensirion™</i> | 17 |
| <i>Tabla 3. Temporada de Ensayos</i> | 21 |
| <i>Tabla 4. Datos meteorológicos ensayo ventilador apagado</i> | 22 |
| <i>Tabla 5. Datos meteorológicos ensayo ventilador encendido</i> | 22 |
| <i>Tabla 6. Datos de meteorológicos en proceso de secado de zanahoria</i> | 23 |
| <i>Tabla 7. Temperaturas caracterización ventilador apagado</i> | 24 |
| <i>Tabla 8. Temperaturas caracterización ventilador encendido</i> | 28 |
| <i>Tabla 9. Humedad Final Zanahoria</i> | 37 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Secaderos | 11 |
| Figura 2. Secadero visión frontal y exterior | 12 |
| Figura 3. Secadero visión frontal e interior | 13 |
| Figura 4. Tarjeta TurboTag® | 14 |
| Figura 5. Pantalla del software Session Manager, versión 2.4.1.0 | 14 |
| Figura 6. Lector de Tarjeta TurboTag® | 15 |
| Figura 7. Lector DR-1 leyendo una tarjeta | 15 |
| Figura 8. Sensirion™ | 17 |
| Figura 9. Tarjetas TurboTag® Ubicación Interna Caracterización Secadero | 18 |
| Figura 10. Tarjetas TurboTag® Ubicación Externa Caracterización Secadero | 18 |
| Figura 11. Tarjetas TurboTag® en bandejas proceso de secado de Zanahoria | 18 |
| Figura 12. Sensirion™ Ubicación Interna y Externa en proceso de secado de Zanahoria | 19 |
| Figura 13. Pelado y corte de la zanahoria para proceso de secado | 20 |
| Figura 14. Distribución de láminas de zanahoria en bandeja | 20 |
| Figura 15. Sensores TurboTag® y Sensirion™ en el proceso de secado de zanahoria | 23 |
| Figura 16. Caracterización Secadero No. 1 sin ventilador | 25 |
| Figura 17. Caracterización Secadero No. 2 sin ventilador | 25 |
| Figura 18. Colector y Entrada de Aire Secadero No. 1 sin ventilador | 26 |
| Figura 19. Colector y entrada de aire Secadero No. 2 sin ventilador | 27 |
| Figura 20. Caracterización Secadero No. 1 con ventilador | 29 |
| Figura 21. Caracterización Secadero No. 2 con ventilador | 29 |
| Figura 22. Colector y entrada de aire Secadero No. 1 con ventilador | 30 |
| Figura 23. Colector y entrada de aire Secadero No. 2 con ventilador | 30 |
| Figura 24. Temperatura Aire en Bandejas Proceso de Secado Zanahorias TurboTag® Etapa I | 32 |
| Figura 25. Temperatura Aire en Bandejas Proceso de Secado Zanahorias TurboTag® Etapa II | 32 |
| Figura 26. Temperatura del Aire en Secadero, Proceso de Secado Zanahorias Sensirion™ | 33 |
| Figura 28. Comportamiento de Temperaturas en el Secadero, Proceso de Zanahoria | 34 |
| Figura 27. Humedad del Aire en Secadero, Proceso de secado Zanahorias Sensirion™ | 34 |
| Figura 29. Comportamiento de la Temperatura en el Colector, Proceso de Zanahoria | 35 |
| Figura 30. Comportamiento de la Humedad en el Secadero, Proceso de Zanahoria | 36 |
| Figura 31. Zanahoria en proceso, 19 de agosto 2010 | 37 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la Universidad Politécnica de Madrid, se encuentra en desarrollo un proyecto de investigación, para la puesta a punto y supervisión de un secadero de alimentos, utilizando para su proceso energía solar. Se cuenta con la experiencia obtenida durante la ejecución del proyecto ya concluido: “Estimación del secado de madera empleando sensores de bajo coste”, financiado por AECID¹ y realizado en colaboración con la Universidad de Oriente en Cuba (Barreiro et al., 2009).

En el trabajo anteriormente descrito, se utilizó el mismo modelo de equipo de secado que en este proyecto, en el se instalaron termopares tipo T (para el control de la temperatura de la madera) y sensores SENSIRIONTM, (para el seguimiento de temperatura y humedad relativa del aire).

Barreiro et al., (2009) concluye que en un secadero solar con las condiciones de temperatura y humedad del aire empleado en el secado, son variables y dependientes de la evolución diurna y de las condiciones climatológicas externas, lo que hace muy necesario una supervisión continua de las condiciones de secado.

En su trabajo recomienda la utilización de los sensores de temperatura y humedad relativa, para una supervisión multidistribuida y control del proceso de secado.

1.2 Justificación del proyecto

El secado de alimentos es una de las técnicas, más utilizada y antiguas para la conservación de alimentos; el aprovechamiento de la radiación solar como fuente de energía para llevar a cabo este proceso, proporciona un método económico de fácil adaptación y manejo; adicional a que se mantienen las características del producto, como lo pueden ser sabor, color y calidad nutricional.

Prakash (2003) Los alimentos deshidratados ofrecen mayor vida útil, diversidad de productos y la reducción de volumen; estas son las razones de la popularidad de secado de frutas y hortalizas, y podría ser ampliado aún más con las mejoras en la calidad del producto y las aplicaciones de proceso.

Este proyecto de secado de alimentos utilizando energía solar, se desarrolla basándose en las investigaciones anteriores realizadas en el departamento de Ingeniería Rural de la Universidad Politécnica de Madrid sobre el secado con energía solar aplicado en tablas de madera, y la propia

¹ Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

experiencia profesional de la autora en procesos de deshidratación de alimentos, unido al hecho de tener el equipo disponible.

Zielinska (2009) Utilizó como producto alimentario la zanahoria, ya que es una de las hortalizas de raíz más consumidas en diferentes platos en todas las regiones a nivel mundial, por su alto nivel nutricional, aportando al consumidor vitaminas B1, B2, B6 y B12, adicional en ser rica en β -caroteno que es un precursor de la vitamina A.

Hecha la revisión bibliográfica de productos hortofrutícolas, se ha escogido la zanahoria como producto a secar, ya que es un producto de alto consumo en variedad de alimentos a nivel mundial y la posibilidad de cosecha durante varias épocas al año.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Proceso de Secado

El secado es un proceso en el que el contenido de agua se disminuye para detener o ralentizar el crecimiento de microorganismos perjudiciales así como otras reacciones químicas que provocan alteraciones indeseables en el alimento. El USDA (departamento de agricultura de Estados Unidos) define como producto deshidratado el que no contiene más del 2.5% de agua (sobre materia seca (m.s.)) y alimento seco el que habiendo sido sometido a un proceso de secado presenta contenidos de agua por encima del 2.5% (sobre m.s.).

Ayensu, Akwasi (1997) recomienda porcentajes inferiores al 14% de agua en base húmeda (b.h.) lo que permite que el producto seco se conserve durante un año sin deterioro.

El secador de energía solar, lo clasifica Fito (2001) como un equipo directo o convectivo, caracterizado por utilizar gases calientes, (nuestro caso aire calentado por radiación solar) que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección y que arrastran fuera del secadero los gases con la humedad retirada del producto.

En el tipo de secadero convectivo, el consumo de combustible es tanto mayor cuanto más bajo es el contenido de humedad residual del producto final, ya que se intenta eliminar el agua de composición del alimento.

Sharma, Atul (2009) describe la operación de secado en cámara con energía solar como una alternativa de procesamiento de frutas y verduras en condiciones limpias, higiénicas y sanitarias ajustadas a las normas nacionales e internacionales, que permite el ahorro de energía, tiempo, y espacio.

Según Prakash (2003) en los países tropicales la deshidratación de frutas y hortalizas mediante secado al sol es una práctica popular debido a su bajo costo.

La deshidratación mediante secaderos solares es una oportunidad en zonas con elevada radiación solar, permitiendo la obtención de un producto más rentable por el ahorro en energía, que genera productos de larga vida útil y buenas características organolépticas

Según Imre (1997) la rentabilidad del producto secado con energía solar, está influida en la capacidad de comercialización y generación de ingresos potenciales, dado que tiene un precio más alto, que son generados por la baja capacidad de los equipos, pero que generan a la vez mejores características de calidad al producto. Entre las ventajas que presenta el secado solar, es la energía (limpia, renovable y que no es posible ser monopolizada).

De acuerdo con Fito (2001) el secado con energía solar, para una producción de tipo industrial presenta ciertas limitaciones, elevando el coste de mano de obra, equipos de grandes dimensiones y posibles degradaciones debido a reacciones bioquímicas o microbiológicas; sin olvidarse de la dificultad de no ser controlable el carácter periódico de la radiación solar, dificultad que por otra parte puede solucionarse utilizando acumuladores de calor o utilizando una fuente de energía auxiliar. Lo anterior plantea la inquietud de generar métodos de evaluación adecuados para controlar el proceso.

La energía solar puede ser utilizada de manera rentable para el secado; el objetivo del proceso es coordinar con las características específicas de la radiación solar. Por tanto, las circunstancias geográficas que determinan el número de días soleados del año y la intensidad de radiación incidente, son diferentes dependiendo de la zona de ubicación en la Tierra.

Concluyendo lo anterior la utilización de energía solar puede ser más adecuada para procesos de secado que presenten pequeñas demandas de energía, en zonas de alta radiación solar, por periodos prolongados durante épocas del año o en su totalidad.

Según Imre (1997) en el caso de los secadores solares más simples, el proceso de secado debe ser continuamente controlado. Las principales acciones que participan en la formulación de una estrategia adecuada para la dirección de la operación son:

- La alimentación de material fresco en el secadero.
- Regulación del caudal de aire.
- La regulación de la recirculación de aire (si la hubiere).
- Correcto funcionamiento de la fuente auxiliar de energía (ventilador).
- La temperatura del aire de trabajo.
- Flujo de masa.

- Humedad relativa del aire de secado.
- Valores de los límites (Mínimos y Máximos), de ciertos parámetros.
- Tasa de secado.
- La carga del almacenamiento térmico.

Fudholi, A (2010) dice que la energía necesaria para el secado de los productos agrícolas se puede determinar a partir del contenido de humedad inicial y final de cada producto. Los productos tienen diferentes velocidades de secado y temperaturas máximas admisibles.

Para la evaluación del secadero y su eficiencia, Augustus Leon, M. (2002) enumera una serie de variables que son convenientes supervisar.

Las más importantes en relación con el tipo de pruebas a realizar para este trabajo son: temperatura y humedad relativa del aire de secado.

El tiempo del proceso se puede mejorar, basándose en las recomendaciones de (Wang J. 2004) que concluye que, según el espesor de la muestra disminuye, la carga másica disminuye, la tasa de deshidratación aumenta y disminuye el consumo de energía de secado.

Karim, Md Azharul (2005) en su investigación de secado con frutas tropicales evidenció que las variables de temperatura y velocidad del aire, afectan directamente a la velocidad de secado. Así, observó que la velocidad de secado se incrementó de 0,0132 g de agua por g de m.s. y min a 0,0321 g de agua por g de m.s. y min, al aumentar la temperatura del aire de 40 °C a 60 °C. Por otra parte, la velocidad de secado se incrementó de 0,0286 g de agua por g de m.s. y min a 0,0321 g de agua por g de m.s. y min al aumentar la velocidad del aire de 0,3 m/s a 0,7 m/s a 60°C.

Prakash (2003) dice que la temperatura tiene un papel importante en la determinación de la calidad del producto seco, obteniendo mejor calidad del producto debido a la lenta velocidad de secado.

El-Aouar, Ânoar Abbas (2003) en su investigación establece que en el proceso de secado de papaya, la velocidad del aire y la temperatura influyen fuertemente en la velocidad del secado durante la primera fase del proceso. Sin embargo, durante la fase final del proceso, la temperatura es la variable que ejerce más influencia en la de la velocidad de secado.

Dissa, A.O. (2009), indica que en los primeros días del ciclo de secado se puede generar costra superficial que aumenta la resistencia externa del alimento a la transferencia de agua, este efecto indeseable debe evitarse regulando el caudal y temperatura del aire, y las variables que caracterizan cada proceso de secado en relación al producto.

Hawtlader, M. N. A (2006) denomina esta dureza como cementación, explica que este fenómeno puede bloquear la transferencia de calor, resultando en una disminución de la tasa de transferencia de humedad; esta resistencia está relacionada con la evaporación del agua en la superficie del producto al inicio del secado.

Imre (1997) describe una serie de características iniciales del producto a tener en cuenta en el proceso de secado:

Propiedades Físicas:

- Dimensiones y forma: cuanto menor sea la dimensión, menor será el tiempo de secado.
- Presencia de piel o no: Hace que el proceso de secado quede afectado en gran medida, principalmente en lo que se refiere a la cinética de secado.
- Propiedades mecánicas: Influyen en gran medida en la elección y diseño del equipo de secado. La dureza del material permitirá agitarlo de forma más o menos brusca, ya que el producto puede sufrir daños mecánicos durante el secado. La adhesividad deberá tenerse en cuenta para permitir la correcta circulación del producto a través del secador.

Propiedades Químicas y Bioquímicas:

Las propiedades químicas más importantes a conocer, son los elementos constitutivos del producto. Por otro lado, las propiedades bioquímicas son importantes en lo que se refiere a los cambios que sufre el material durante el secado y/o posterior almacenamiento.

2.2 Zanahoria Deshidratada

Zanahoria (*Daucus carota* L.) es conocida por su el contenido de nutrientes, además de cantidades apreciables de B1, B2, B6 y B12 vitaminas y minerales. Kaya (2008).

Koca (2005) la sitúa entre los alimentos que se consumen en mayor cantidad; la zanahoria es una hortaliza que tiene uno de los más altos niveles de carotenoides, siendo este un precursor de la vitamina A, con gran interés por su papel como antioxidante.

Para Lin (1998) la zanahoria deshidratada se utiliza como ingrediente en sopas instantáneas o las comidas y es un excelente candidato para el desarrollo de bocadillos saludables libres de aceite, si el valor nutricional puede ser bien conservado durante el secado.

Prakash (2003) cita el trabajo realizado por Sagar et al., (1997) y al Jayaraman et al., (1991) Las zanahorias se distribuyen en patios abiertos y la energía solar se utiliza para su deshidratación.

Zanahorias deshidratadas por este método son susceptibles de contaminación durante el secado y se pueden provocar productos de mala calidad, sobre todo de cambios de color y sabor debido a la exposición directa al sol. Este inconveniente puede ser superado por cubrir las zanahorias con tapas de vidrio y modificando la concentración de la radiación solar sobre la superficie.

Es recomendable en zanahoria deshidratada, realizar un escaldado previo, con el fin de inactivar la enzima peróxidasa, de lo contrario puede conducir a la generación de colores y sabores inaceptables, también se ha estudiado que el escaldado, puede mejorar la estabilidad de los carotenoides durante el almacenamiento.

Previamente a la operación de secado se realiza el lavado, desinfección, pelado y corte de la zanahoria. La operación de disminución de tamaño permite diversificar el producto obtenido en función del tipo de corte practicado ya sea en láminas, cubos o cilindros

Diversos investigadores han concluido para el proceso de secado de la zanahoria los siguientes aspectos:

Wang (2004) en su investigación de secado de zanahoria en microondas, realizó pruebas con diferentes medidas de grosor 3, 5 y 7 mm, encontró que, a medida que el espesor de la muestra aumenta, el tiempo necesario para alcanzar un determinado contenido de humedad es mayor y la pérdida de agua es más lenta.

Para Fito (2001) los aspectos organolépticos y nutricionales deseados en el producto final son determinantes para la correcta definición de las condiciones del aire de secado. Una excesiva velocidad de secado puede producir costra indeseable, que además generan zonas en el interior del producto, difíciles de secar y/o con una elevada humedad.

Una elevada temperatura del aire de secado, puede producir el deterioro de las vitaminas del producto, y la aparición de colores y aromas extraños.

De acuerdo con Zielinska (2009) en los productos alimenticios que se someten a cambios volumétricos, por acción de pérdida de agua, este efecto se expresa como contracción. Cualquier intento de caracterizar el comportamiento del material de secado de alimentos deben abordar los parámetros físicos del material tales como contracciones y densidad. Estos cambios en la macro y microestructura de sólidos secos, se producen de forma continua durante el proceso de secado, sobre las propiedades físicas de los sólidos, así como las propiedades de transporte

Las altas temperaturas combinada con un largo tiempo de exposición puede causar daños graves de sabor, color, nutrientes y la capacidad de rehidratación de productos secos. Además, es posible que el tratamiento a larga exposición térmica de las zanahorias con aire caliente pueda acortar la vida útil de un producto seco.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el montaje de un proyecto de secado con energía solar, Chen, Ho-Hsien (2005) lista los factores externos a tener en cuenta en este proceso: radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del aire y humedad relativa; y los factores internos relativos al producto: contenido de humedad inicial y final, tipo de producto. Es importante tener en cuenta estos factores para poder realizar un seguimiento continuo del proceso con el fin de evaluar su viabilidad y eficiencia.

En relación a las variables descritas anteriormente, se quiso caracterizar el secador con la cámara vacía, utilizando sensores de temperatura en dos momentos de secado, secadero con ventilador apagado y con ventilador encendido, realizado en los dos secaderos paralelamente con el fin de describir el movimiento del aire y los incrementos de temperatura dentro de la cámara.

Posteriormente se realizó un proceso de secado de zanahoria en un secadero con el ventilador encendido, y con estos resultados evaluar el comportamiento del aire de secado como también las características del proceso y organolépticas del producto.

3.1 Equipo

Los secaderos experimentales utilizados para la investigación son propiedad de la Universidad Politécnica de Madrid (Figura 1), estos secaderos se encuentran ubicados en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos; están contruidos en acero inoxidable apto para la utilización de alimentos, fabricados por la empresa CONA, tienen una capacidad de $0,3 \text{ m}^3$ cada uno.



Figura 1. Secaderos

Los componentes y zonas del equipo son (Figura 2 y 3):

1. Entrada de aire desde el exterior del secador al colector solar
2. Colector solar
3. Entrada del aire caliente a la cámara, adicionalmente en esta zona sucede la mezcla de aire del colector solar y aire recirculado.
4. Bandejas de ubicación del producto
5. Zona de movimiento del aire hacia la compuerta de salida.
6. Compuerta exterior de salida del aire de secado

El sistema de secado de este equipo, se basa en la generación de aire caliente por medio de un colector solar (2), este aire ingresa desde el exterior (1) al colector, en esta zona es calentado por acción de la radiación solar y es impulsado por la acción de un ventilador (3), el cual genera el caudal de aire necesario para que se mueva a través de las bandejas con producto (4); el aire húmedo de la cámara (5) se arrastra hacia la compuerta de salida(6) y es llevado nuevamente al exterior

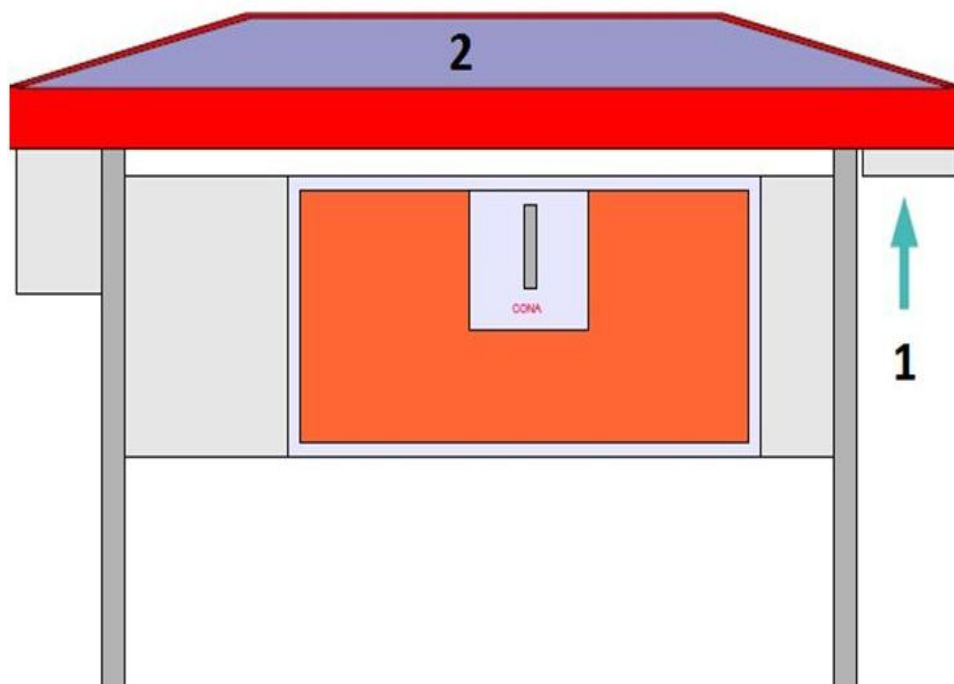


Figura 2. Secadero visión frontal y exterior

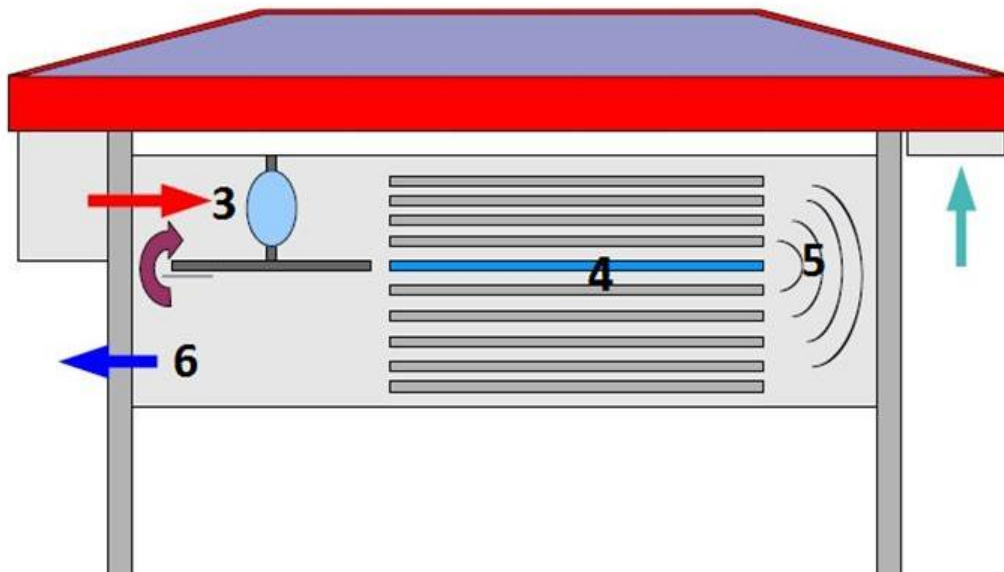


Figura 3. Secadero visión frontal e interior

En la cámara de secado se tienen 9 bandejas de malla con agujeros circulares y una bandeja “ciega” sin agujeros ubicada en la posición 5, (número 4 de la Figura 3, bandeja color azul).

Las bandejas se encuentran montadas una sobre otra con una separación conveniente para la circulación de aire. Estas bandeja se encuentran perforadas con el fin que el aire caliente circule a través de la capa de sólidos, con lo cual se consigue aumentar la superficie expuesta a la acción del aire y disminuyendo consiguientemente la duración del ciclo de secado.

Fito (2001) afirma que los secadores de bandejas, son útiles para secar pequeñas cargas, cuando la capacidad necesaria no exceda de 25 a 50 Kg/h de producto seco.

Para la caracterización del secadero se utilizaron dos tipos de sensores, tarjetas TurboTag® “Extendidas” (Figura 4). y sensores Sensirion™ (Figura 8),

3.2 Sensores

3.2.1 Tarjetas TurboTag ®

Es un producto para monitorización de temperatura (ver características en Tabla 1) que está diseñado para obtener datos correctos y eficientes; su sistema de comunicación es por frecuencia de radio (RF). Cada tarjeta tiene una precisión de $\pm 0,5$ °C en todo el rango de operación. Su límite de almacenamiento de datos, es un archivo de hasta 702 mediciones. Tiene el tamaño de una tarjeta de crédito



Figura 4. Tarjeta TurboTag ®

Para descargar los datos es necesario utilizar *Session Manager Version 2.4.1.0* (Figura 5), un software de administración diseñado por la empresa fabricante; permite realizar lecturas de los datos de las tarjetas, programación del inicio de lecturas de datos, tiempo de intervalos entre cada dato, tiempo de finalización de toma de datos, límite superior e inferior de temperatura y visualmente en la pantalla del software se visualiza gráficos de temperatura respecto del tiempo con límites superiores e inferiores de temperatura (programados por el usuario), permite dejar (apagada) la tarjeta en el momento de la lectura ahorrando batería.

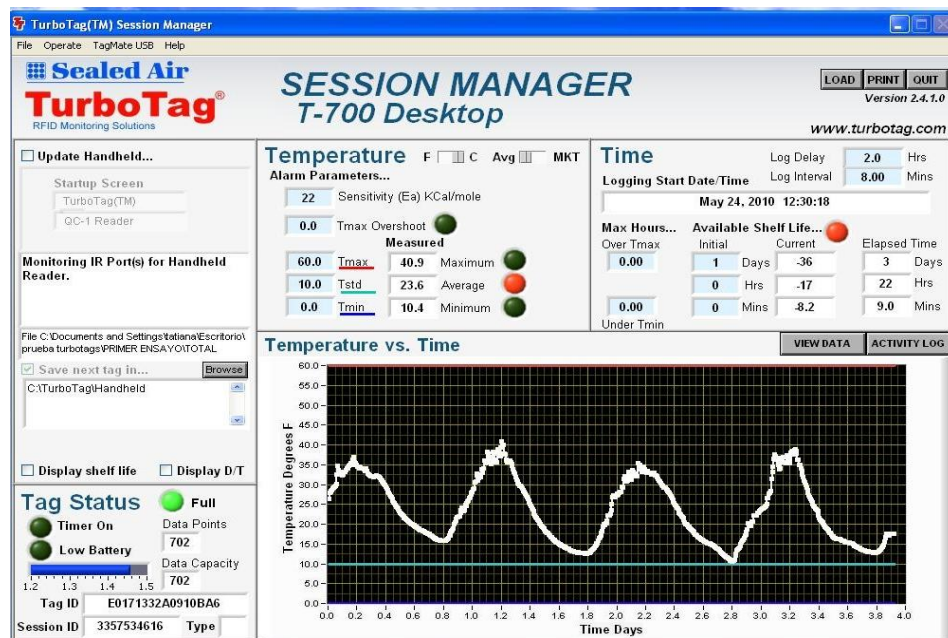


Figura 5. Pantalla del software Session Manager, versión 2.4.1.0

Para el inicio o lectura de la tarjeta se utiliza un lector, llamado DR-1 (Figura 6), proporcionado por la misma empresa; este es un pequeño dispositivo USB con conexión para PC, con el cual se comunica al software de Administrador de Sesión. En este dispositivo se puede establecer comunicación con la tarjeta, hasta con una distancia de 5cm aproximadamente. No siendo necesario entrar en contacto directo entre el dispositivo lector y la tarjeta. Figura 7.



Figura 6. Lector de Tarjeta TurboTag®



Figura 7. Lector DR-1 leyendo una tarjeta

Las tarjetas TurboTag ®, T702-B poseen las siguientes características:

| | |
|--|---|
| Número de medidas: | 702 |
| Rango de temperatura: | -55°C a +80°C (-67°F a +176°F) |
| Precisión de temperatura: | +/- 0,5°C (+/- 0,9°F) con calibración AccuZone™ (95% C.I.) |
| Espacio del tiempo del control: | 20 minutos mínimo, 3 meses máximo |
| Retardo del control: | 0 minutos mínimo, 21 días máximo |
| Interfaz RFID: | 13,56 MHz pasivo - Conforme a ISO 15693-3 |
| Distancia de lectura RFID: | 1 a 12 pulgadas (mayor distancia con refuerzo de antena) |
| Tiempo de captura de datos: | Menos de 2 segundos |
| Alarmas: | Alarmas altas y bajas configuradas por el usuario / almacena tiempo por encima / por debajo |
| Medias: | Almacena temperatura media aritmética o MKT (media geométrica) |
| UHF: | Almacena código EPC de 24 caracteres (manualmente o del lector UHF) |
| Registro de Software: | El software Session Manager™ crea archivos y/o registros de base de datos |
| Parámetros de vida útil: | Almacena la sensibilidad de la temperatura basada en el modelo cinético Arrhenius |
| Vida útil: | Proporciona la información restante de vida útil en el punto de lectura |

Tabla 1. Características TurboTag ®, T702-B

3.2.2 Sensirion™

La compañía sueca Sensirion™ fabrica diferentes modelos de sensores de temperatura y humedad relativa de alta fiabilidad. Se utilizó el Sensirion™ SHT sensor capacitivo, que se caracteriza por poseer dimensiones muy pequeñas (tipo pin) (Figura 8).

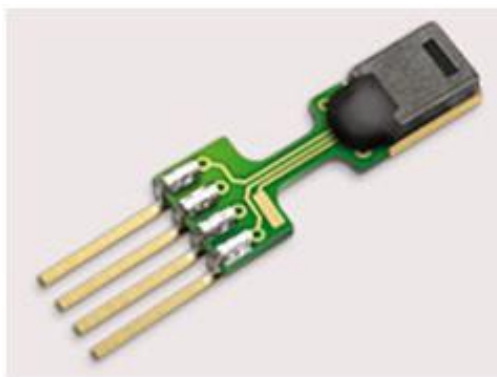


Figura 8. Sensirion™

El rango de medida de la humedad relativa es de 0 a 100 % mientras que el de la temperatura es de - 40 hasta 125°C. Por lo que se adaptan a las condiciones que se obtienen en el secadero.

En la Tabla 2. Se describen las características del Sensirion™; para la lectura y recolección de datos del sensor se utilizó el software “GERA”, en conjunto con en el (CENIM)² el cual permite almacenar en el disco duro de un ordenador conectado en red, los datos que se van generando.

| | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Consumo de Energía: | 80uW (a 12 bits, 3V, 1 medida /s) |
| Rango de Humedad Relativa: | 0 a 100% HR |
| Rango de Temperatura: | -40 A 125 ° C (-40 a 257 ° F) |
| Tiempo de respuesta HR: | 8 segundos (tau 63%) |
| Salida: | Digital (2-hilos de interfaz) |

Tabla 2. Características Sensirion™

3.2.3 Montaje de los sensores

Para la caracterización del secadero se ubicaron 32 tarjetas TurboTag ® T702-B identificadas como T₁ hasta T₃₂ (Figura 9 y 10); se ubicaron en las diferentes zonas del secadero sin producto, en la cámara de secado por cada bandeja se ubico 2 tarjetas TurboTag ®.

² CENIM. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas perteneciente al (CSIC) Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

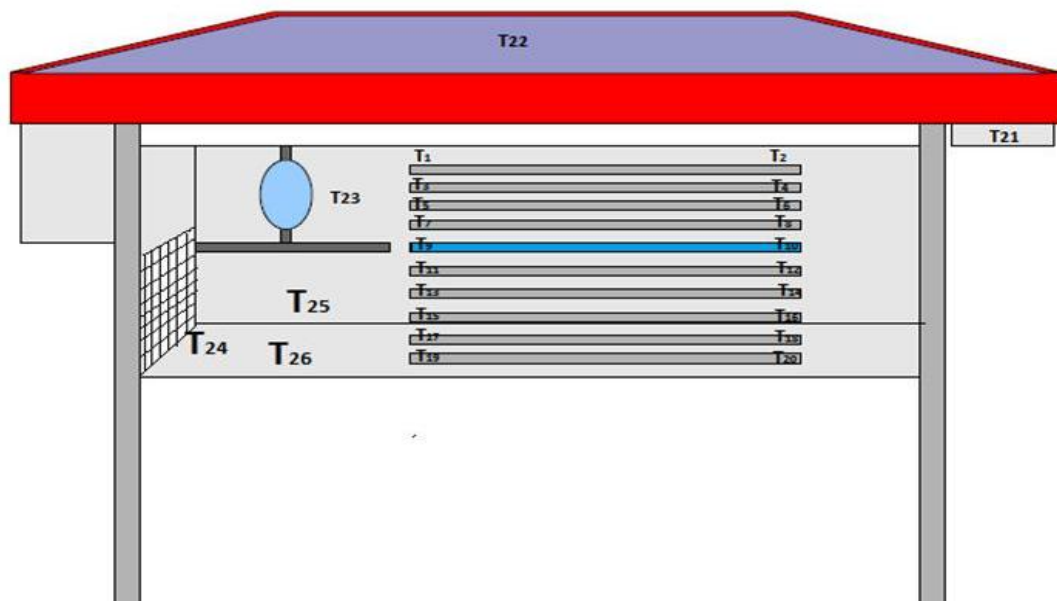


Figura 9. Tarjetas TurboTag® Ubicación Interna Caracterización Secadero

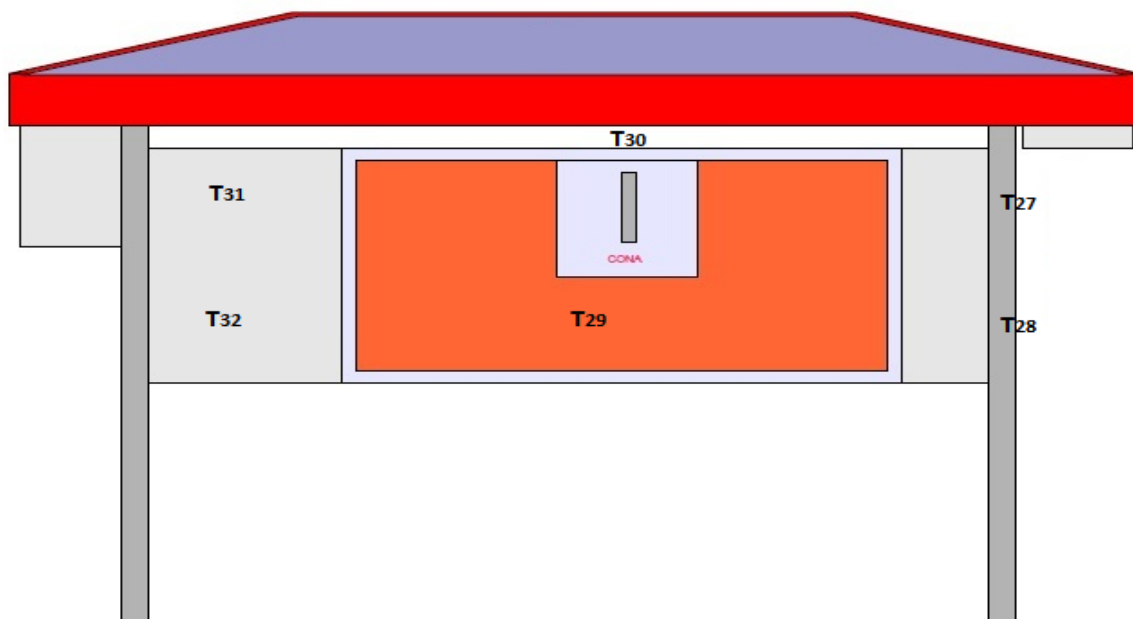


Figura 10. Tarjetas TurboTag® Ubicación Externa Caracterización Secadero

Para el proceso de secado se ubicaron 5 tarjetas TurboTag® T702-B (Figura 11), por bandeja en total 50 tarjetas en todo el secadero y (10) sensores Sensirion™ (Figura 12).

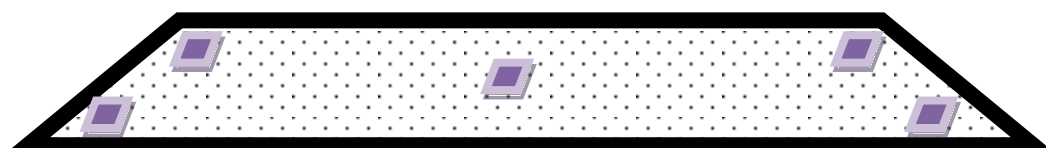


Figura 11. Tarjetas TurboTag® en bandejas proceso de secado de Zanahoria

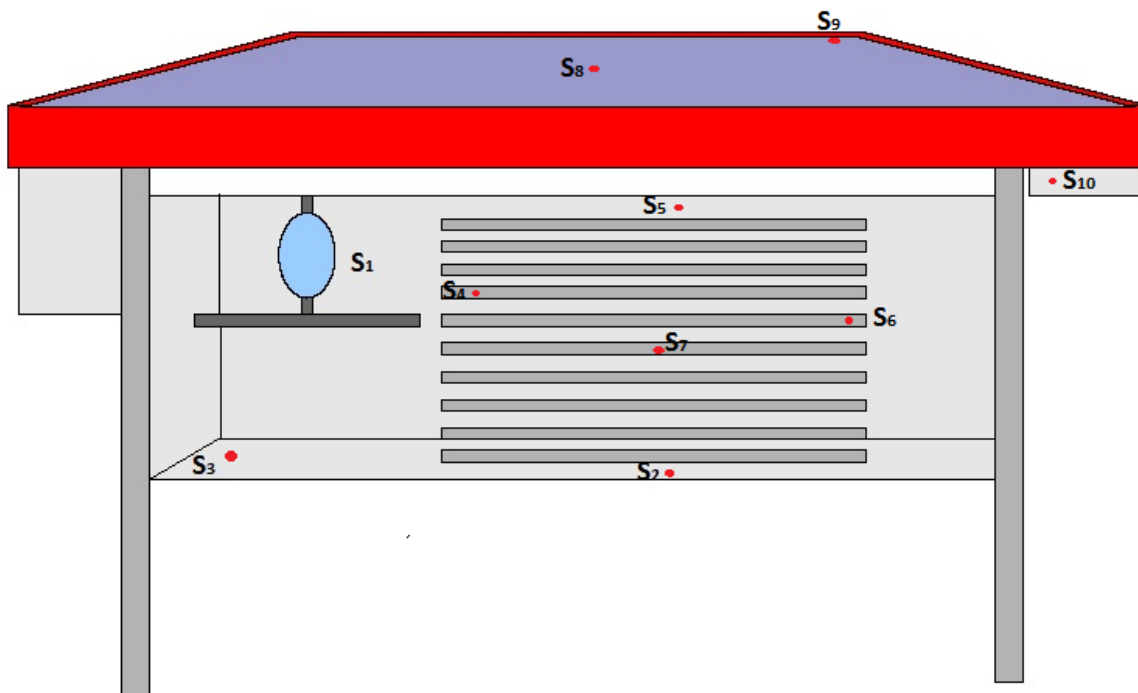


Figura 12. Sensirion™ Ubicación Interna y Externa en proceso de secado de Zanahoria

3.3 Material

Zanahorias frescas (*Daucus carota* L) fueron adquiridas en un supermercado en la región de Madrid. Según Doymaz (2004) las zanahorias frescas contienen una humedad de 87,5% (p/p).

Antes del ensayo las zanahorias enteras fueron lavadas y peladas en un cuarto de zona, dejando los laterales de cada rodaja con cáscara; a continuación fueron cortadas con un cuchillo en láminas de 5 mm de espesor y 60 mm de longitud. Figura13.



Pelado de la zanahoria



Corte de la zanahoria



Corte de la zanahoria



Laminas de zanahoria

Figura 13. Pelado y corte de la zanahoria para proceso de secado

El espesor de la lámina de zanahoria, se seleccionó un poco más grande de la recomendada en los ensayos consultados, con el fin que el tiempo de secado fuera más largo y obtener un mayor seguimiento y número de datos en tiempo. Esta decisión fue basada en las conclusiones del trabajo de Prakash (2003) donde la ausencia de un período de velocidad constante puede ser debido a la delgada capa de producto que no proporcionan un suministro constante de agua durante un período considerable de tiempo. Por lo cual un mayor espesor en el producto debería resultar en un mayor tiempo de proceso.

Baloch et al., (1977) recomienda realizar un escaldado antes del secado, con el fin de inactivar la enzima peróxidasa, que puede conducir a formación de colores y sabores inaceptables. Para este proyecto no se realizó el escaldado, con el fin que los resultados obtenidos evidencien el comportamiento real del la humedad relativa del aire que fluye por la cámara durante un proceso de secado. Además se pretendía comparar el proceso con el secador vacío y con el secador con producto, evitando influencias de aumento de humedad al inicio del proceso, debido a que las láminas se encontraran con humedad superficial agregada.

Realizado el corte se distribuyeron uniformemente las láminas de zanahoria (Figura 14). En las 10 bandejas del secadero con un peso promedio inicial de 1200g de producto/bandeja.



Figura 14. Distribución de láminas de zanahoria en bandeja

3.4 Proceso

Se pretendió conocer el movimiento del aire dentro del secadero en dos situaciones:

Tabla 3. Temporada de Ensayos

| SITUACION | DESCRIPCIÓN PROCESO | FECHA DEL PROCESO |
|------------------------------|---|---|
| Caracterización del secadero | Secadero vacío con el ventilador apagado | 24 de mayo de 2010 hasta 28 de mayo de 2010 |
| | Secadero vacío con el ventilador encendido | 14 de junio de 2010 hasta 18 de junio de 2010 |
| | Secadero con zanahoria ventilador encendido | 16 de agosto de 2010 hasta 22 de agosto de 2010 |

3.4.1 Caracterización de Secaderos

En este proceso se utilizaron 32 tarjetas TurboTag®, Figura 9 y 10, se programaron para que obtuvieran datos cada 9 minutos, con lo cual se obtuvo un total de 702 datos en 4 días de proceso, se ubicaron de la siguiente forma:

- 20 Tarjetas en las bandejas (2 en cada una).
- 6 Tarjetas en el exterior de la cámara de secado
- 4 Tarjetas en el área de ventilador y salida del aire.
- 1 Tarjeta en sobre el colector del aire
- 1 Tarjeta en la entrada del aire (zona de filtrado del aire entrante)

Se realizó el mismo procedimiento para los dos secaderos, y para dos procesos, con ventilador encendido y ventilador apagado.

El ensayo realizado con el ventilador apagado se llevó a cabo en el mes de mayo, entre los días 24 y 28 de mayo de 2010. En la Tabla 4. Se describe el comportamiento climático en estas fechas.

Los datos fueron reportados por la estación meteorológica: 82210 (LEMD)
 Latitud: 40.45 | Longitud: -3.55 | Altitud: 609: ubicada en Madrid – Barajas.

| Día | Temperatura Media (°C) | Temperatura Máxima (°C) | Temperatura Mínima (°C) | Humedad Relativa Media (%HR) |
|--------------------|---------------------------------------|--|--|---|
| 24 de mayo de 2010 | 22.5 | 29 | 13.9 | 47 |
| 25 de mayo de 2010 | 21.1 | 26 | 17 | 44 |
| 26 de mayo de 2010 | 21 | 26 | 14.7 | 47 |
| 27 de mayo de 2010 | 19.6 | 26 | 11.5 | 48 |
| 28 de mayo de 2010 | 17.7 | 23.6 | 11.7 | 60 |

Tabla 4. Datos meteorológicos ensayo ventilador apagado

El ensayo realizado con el ventilador encendido se llevo a cabo en el mes de junio, entre los días 14 y 18 de junio de 2010. En la Tabla 5. Se describe el comportamiento climático en estas fechas.

| Día | Temperatura Media (°C) | Temperatura Máxima (°C) | Temperatura Mínima (°C) | Humedad Relativa Media (%HR) |
|---------------------|---------------------------------------|--|--|---|
| 14 de junio de 2010 | 18.4 | 25.1 | 12.1 | 60 |
| 15 de junio de 2010 | 15.2 | 19.5 | 10 | 51 |
| 16 de junio de 2010 | 14.2 | 18.1 | 8.5 | 59 |
| 17 de junio de 2010 | 16.9 | 24.5 | 7.4 | 51 |
| 18 de junio de 2010 | 19.7 | 26.7 | 12.2 | 51 |

Tabla 5. Datos meteorológicos ensayo ventilador encendido

3.4.2 Secado de zanahoria

Para el secado de zanahoria se utilizaron las tarjetas TurboTag® y los Sensirion™ (Figura 15) y se ubicaron del siguiente modo:

- 50 Tarjetas TurboTag® en las bandejas (5 en cada una).
- 3 Sensirion™ en las bandejas No. 4, 5 y 6
- 3 Sensirion™ en el exterior de la cámara de secado
- 2 Sensirion™ en el área de ventilador y salida del aire.
- 1 Sensirion™ sobre el colector del aire
- 1 Sensirion™ en la entrada del aire



Figura 15. Sensores TurboTag® y Sensirion™ en el proceso de secado de zanahoria

Este proceso se llevo a cabo en el mes de agosto, en los días comprendidos entre el 16 de agosto de 2010 hasta el 22 de agosto de 2010; el comportamiento climático de estas fechas se describe en la Tabla 6.

| Día | Temperatura Media (°C) | Temperatura Máxima (°C) | Temperatura Mínima (°C) | Humedad Relativa Media (%HR) |
|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 16 de agosto de 2010 | 22 | 27.2 | 15.9 | 50 |
| 17 de agosto de 2010 | 23.6 | 28.8 | 17.7 | 57 |
| 18 de agosto de 2010 | 25.6 | 31.8 | 17.1 | 44 |
| 19 de agosto de 2010 ³ | 22.6 | 28.5 | 17.3 | 59 |
| 20 de agosto de 2010 | 25.4 | 34 | 15.9 | 48 |
| 21 de agosto de 2010 | 27.9 | 36 | 18.4 | 37 |
| 22 de agosto de 2010 | 28.6 | 35.4 | 19.4 | 31 |

Tabla 6. Datos de meteorológicos en proceso de secado de zanahoria

3.5 Análisis de datos

Los datos obtenidos en las tarjetas TurboTag® y los Sensirion™ fueron procesados utilizando el software MATLAB (Versión 7.0 Mathworks Inc., 2004). Con rutinas elaboradas por colaboradores y profesores del departamento de Ingeniería Rural de la Universidad Politécnica de Madrid para la lectura y grafica de las TurboTag®, así como también de los Sensirion™.

³ El día 19 de agosto se presentaron lluvias en la zona de ubicación de los secaderos, para el resto de días en todos los ensayos no se presentaron precipitaciones.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización de secadero

4.1.1 Ensayo Ventilador Apagado

Los datos obtenidos en este ensayo, en el caso de las 10 bandejas del secadero, fueron unificados después de observar que el comportamiento y rango de temperaturas eran iguales, por lo tanto los resultados se promediaron obteniendo una sola curva denominada “Bandejas” que representa la zona que comprende desde la bandeja número 1 hasta la 10. Esto se realizó para el secadero 1 y 2.

Tabla 7. Temperaturas caracterización ventilador apagado

| ENSAYO VENTILADOR APAGADO | Secadero 1 | | Secadero 2 | |
|-----------------------------|------------|------|------------|------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX |
| Bandejas | 10,7 | 34,1 | 10,5 | 33,8 |
| Ventilador | 10,0 | 37,0 | 10,3 | 36,0 |
| Salida de aire de la cámara | 10,2 | 33,3 | 12,0 | 33,0 |
| Exteriores de la cámara | 13,3 | 34,5 | 13,6 | 31,9 |
| Colector | 4,7 | 55,2 | 4,1 | 60,1 |
| Entrada de aire | 9,7 | 64,4 | 9,4 | 74,4 |
| PROMEDIO TOTAL | 14,9 | 26,0 | 16,1 | 24,1 |

En la Tabla 7 se encuentran las temperaturas máximas y mínimas de las diferentes zonas estudiadas en los secaderos, la temperatura máxima fue de 64,4 °C para el secadero 1 y 74,4 °C para el secadero 2, obtenidas en la zona de entrada de aire.

Con el ventilador apagado, el aire entrante al colector es calentado, pero no fluye en su totalidad hacia la cámara de secado; este se almacena a lo largo del colector y es recalentado, por lo cual el sensor lo que está registrando es la temperatura del aire dentro del colector.

El anterior fenómeno, muestra que al no encender el ventilador el aire calentado se regresa a la zona de entrada y es llevado al exterior, ocasionando un desaprovechamiento de aire caliente para el proceso.

El apagar el ventilador puede ser útil en momentos de bajas temperaturas (noche) o donde el aire entrante se encuentre con una humedad alta. Se puede observar que las temperaturas mínimas en los secaderos 4,7 °C y 4,1°C para el secadero 1 y 2 respectivamente se presentaron en el

colector (el sensor de esta zona se encuentra expuesto al medio ambiente) y estas medidas fueron obtenidas sobre la 1:00 am Figura 18 (horas nocturnas); al apagar el ventilador o disminuir su velocidad se puede evitar el ingreso de este aire hacia las bandejas, ya que no cumple las características ideales para el secado y sí puede retrasar el proceso o estropear el producto.

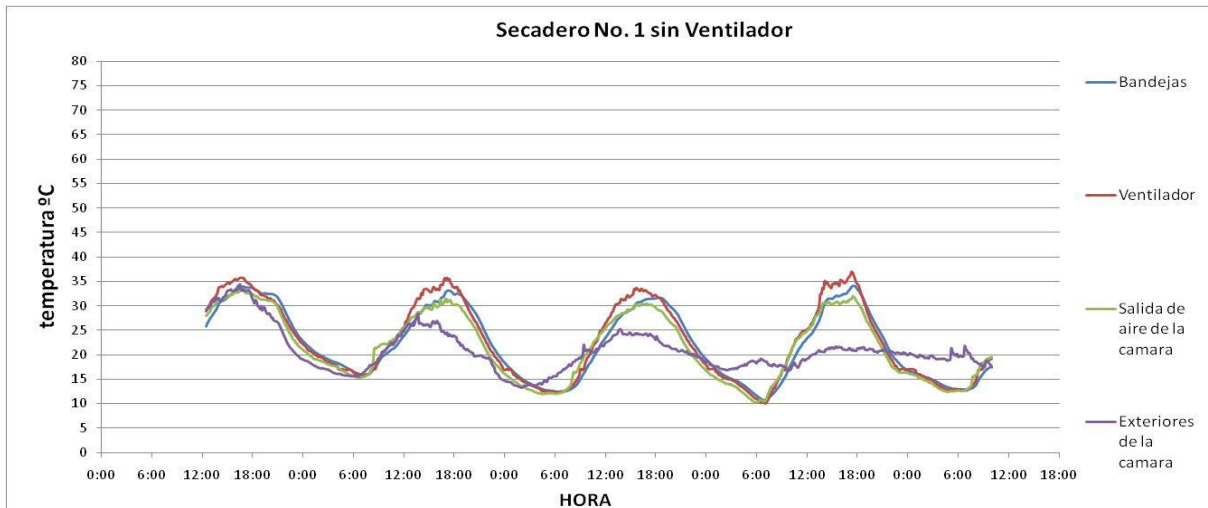


Figura 16. Caracterización Secadero No. 1 sin ventilador

En las figuras 16 y 17 el comportamiento de las temperaturas para los dos secaderos fue similar por lo cual los comentarios y conclusiones que se escriban más adelante en este apartado, harán referencia a los secaderos 1 y 2.

Las temperaturas de las bandejas, ventilador y salida de aire de la cámara, mantuvieron la misma tendencia durante todo el ensayo (figuras 16 y 17). Se puede ver explícitamente los cuatro días y sus noches.

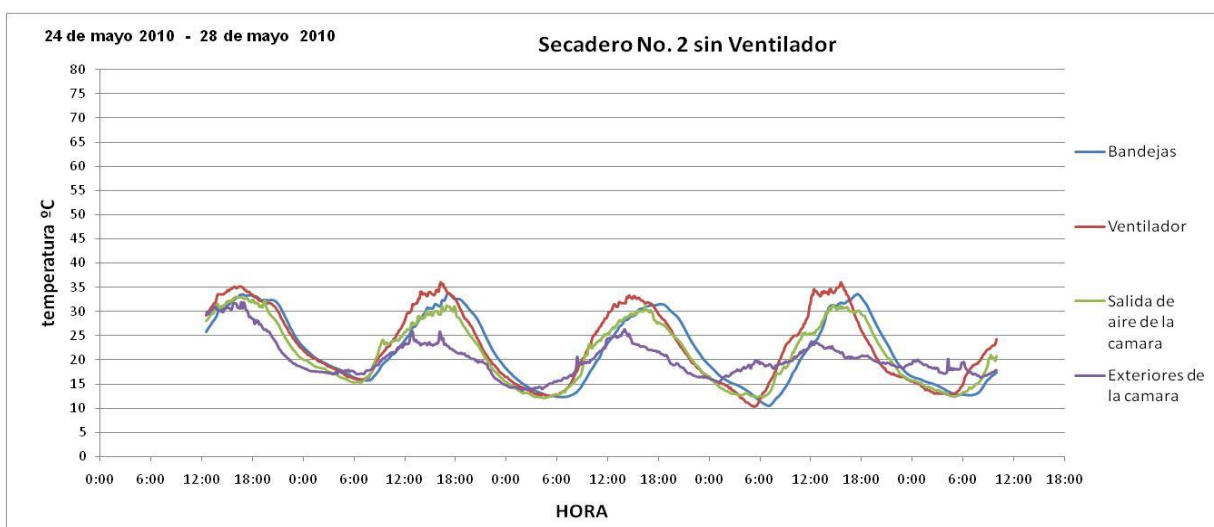


Figura 17. Caracterización Secadero No. 2 sin ventilador

El aire caliente que pasa del colector a la cámara de secado es registrado por el sensor que se encuentra denominado como " ventilador"; podemos observar en las figuras 16 y 17 que la temperatura siempre es superior a las demás zonas en las horas de mayor radiación solar, pero de igual forma es la temperatura más baja en las horas de descenso de la radiación

Las temperaturas en la zona de salida de aire del colector están por debajo en comparación a la zona de bandejas, lo cual evidencia que conforme el aire fluye a través de las bandejas hacia la salida de la cámara hay transferencia de calor.

Los registros de los sensores que se encuentran ubicados en el exterior de la cámara, mantienen una tendencia media con respecto al resto de temperaturas dentro del secador, resultado al intercambio de calor que se presenta del interior de la cámara y las temperaturas del exterior. Como estas se mantienen dentro de un rango promedio del resto de las zonas se concluye que no hay pérdida excesiva de calor por las paredes del secadero.

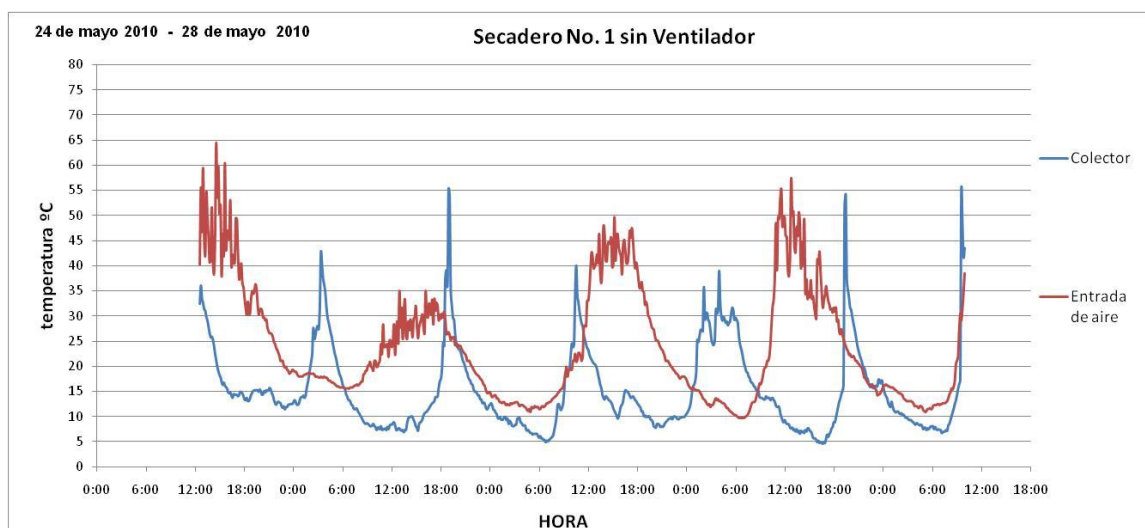


Figura 18. Colector y Entrada de Aire Secadero No. 1 sin ventilador

Las medidas registradas en el colector para los dos secaderos en este ensayo muestran que el comportamiento en esta zona no sigue la tendencia de día y noche como el resto de zonas (Figura 18 y 19).

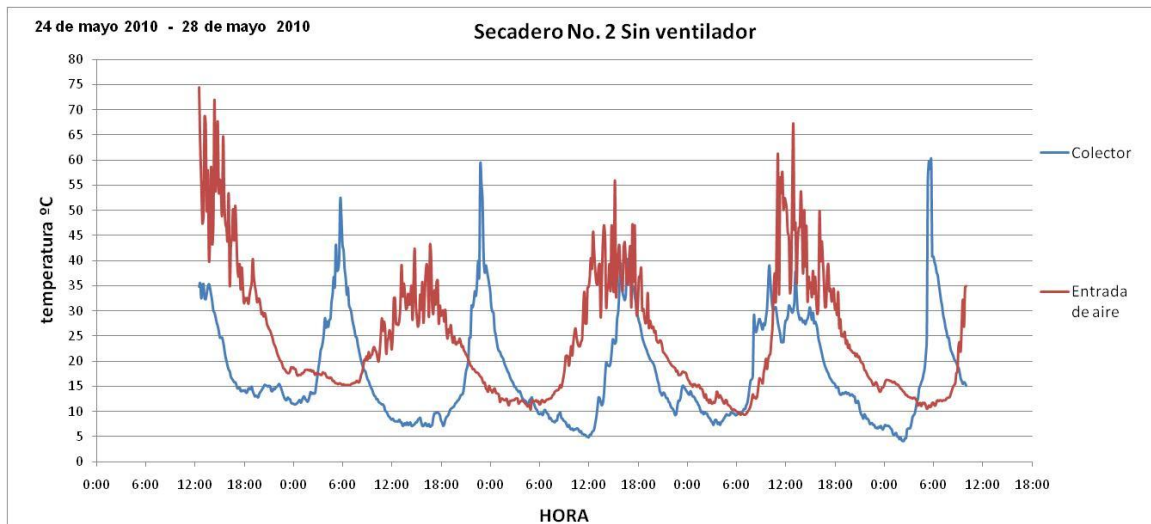


Figura 19. Colector y entrada de aire Secadero No. 2 sin ventilador

El comportamiento del colector corresponde a la remanencia del aire calentado en el interior del colector por la ausencia del ventilador, permaneciendo más tiempo y enfriándose conforme el aire caliente es expulsado al exterior.

En la Figura 18, se observa para todo el ensayo que en las horas nocturnas se presenta un incremento significativo de las temperaturas en la superficie del colector, siendo igual o mayor a las obtenidas en el interior del colector en las horas que hay radiación solar. En el momento que las temperaturas del interior del secadero descienden y al no haber flujo de aire que direcciona el aire hacia la zona de la salida de la cámara, el aire caliente asciende hacia la superficie del colector y se evacua al exterior.

El calentamiento del aire en el colector es producido al generar un efecto invernadero, que consiste en que una parte de la radiación solar que ha atravesado la cubierta (que tiene un alto coeficiente de transmisión de la radiación solar) llega a la placa captadora y es reflejada hacia la cubierta transparente, con una longitud de onda para la cual ésta es opaca, con lo que se consigue retener la radiación solar en el interior, pero en el momento que no hay radiación solar y no haya un agente que fuerce el movimiento del aire del interior del colector, la placa captadora y la cubierta transparente por estar construida de un material de alta conductividad térmica que facilita el intercambio de calor.

4.1.2 Ensayo Ventilador Encendido

Los datos obtenidos en este ensayo en el caso de las 10 bandejas del secadero, fueron unificados al igual que el ensayo del ventilador apagado

Tabla 8. Temperaturas caracterización ventilador encendido

| ENSAYO VENTILADOR ENCENDIDO | Secadero 1 | | Secadero 2 | |
|--|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | MIN | MAX | MIN | MAX |
| Bandejas | 7,4 | 50,9 | 6,8 | 49,8 |
| Ventilador | 7,3 | 52,5 | 7,3 | 49,8 |
| Salida de aire de la cámara | 7,3 | 48,3 | 6,9 | 41,7 |
| Exteriores de la cámara | 7,3 | 34,5 | 8,5 | 36,9 |
| Colector | 2,8 | 43,5 | 2,8 | 31,3 |
| Entrada de aire | 7,0 | 26,4 | 7,2 | 26,5 |
| PROMEDIO TOTAL | 15,7 | 24,5 | 15,5 | 24,4 |

En la Tabla 8, se reflejan las temperaturas máximas y mínimas obtenidas en los dos secaderos durante el ensayo.

Los resultados de este ensayo presentan para las temperaturas máximas como las mínimas, registros más bajos que las obtenidas en el ensayo con el ventilador apagado, este fenómeno es debido al comportamiento climático en la temporada de ensayos ver Tablas 4 y 5.

En este ensayo la temperatura más alta alcanzada es la registrada por el sensor que se encuentra ubicado delante del ventilador, lo cual muestra que todo el aire caliente del colector está pasando por la zona de transferencia entre el colector y la cámara de secado. A diferencia del ensayo con el ventilador apagado, donde la mayoría del aire calentado fue expulsado al exterior sin ingresar a la cámara de secado.

En las Figuras 20 y 21, podemos observar que las zonas de bandejas, ventilador, salida de aire de la cámara y exteriores de la cámara, presentan el mismo comportamiento y rango de temperaturas y dibuja claramente los 4 días de duración del ensayo en los momentos de día y noche.

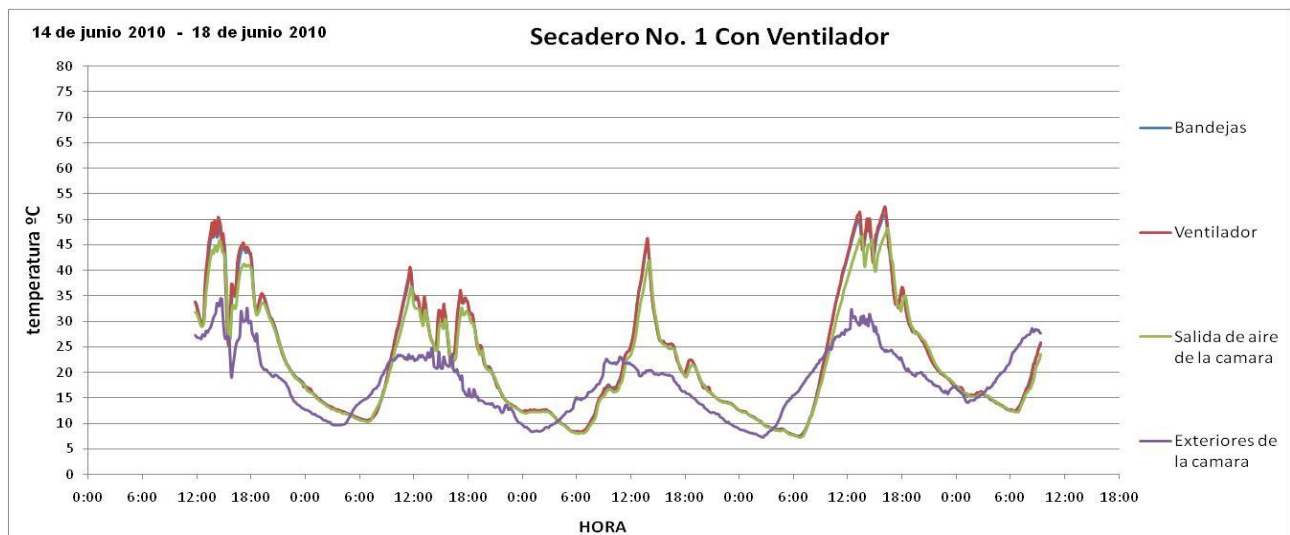


Figura 20. Caracterización Secadero No. 1 con ventilador

Comparando los rangos de temperatura máximas entre los ensayos de ventilador apagado y ventilador encendido con rangos de temperatura de 52 °C y 38 °C respectivamente, se presenta una diferencia de 14 °C para todas las zonas dibujadas en las Figuras 20 y 21. Esto evidencia la pérdida de aire caliente en el ensayo con el ventilador apagado.

Lo anterior demuestra que en los momentos de mayor radiación solar es imprescindible que el ventilador permanezca encendido, para que haya un aprovechamiento máximo del aire calentado en el colector.

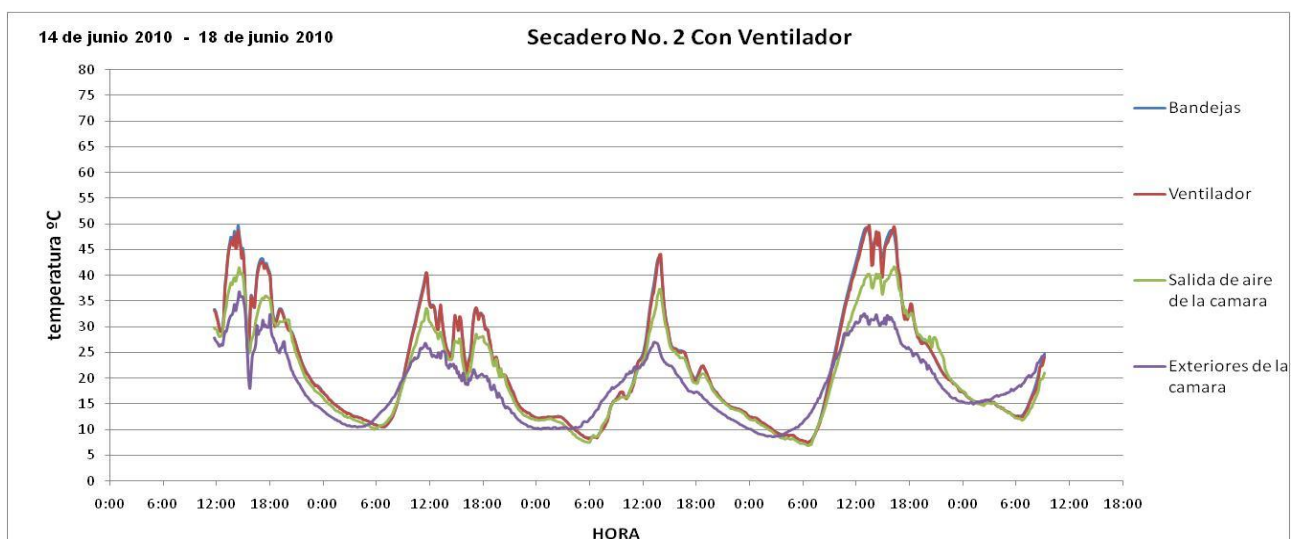


Figura 21. Caracterización Secadero No. 2 con ventilador

Los resultados de los sensores ubicados en los exteriores de la cámara, presentan las menores temperaturas máximas de las zonas graficadas en las figuras 20 y 21, siendo muy cercano a los datos registrados en el ensayo con ventilador apagado (Tabla 7), lo cual evidencia que no hay transferencia de calor a través de las paredes del secadero.

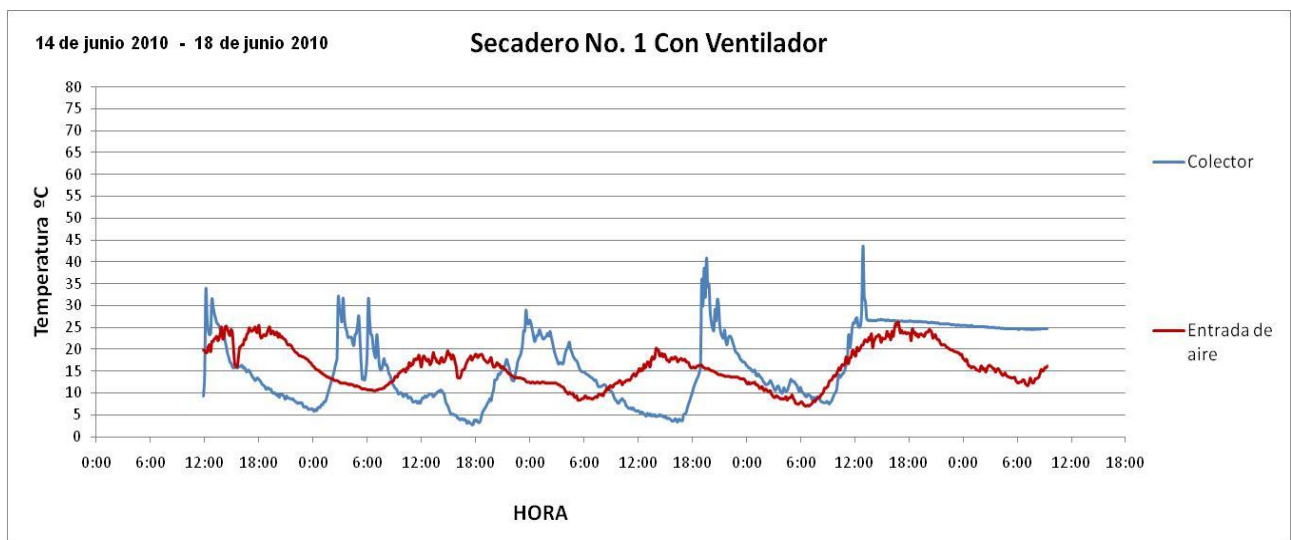


Figura 22. Colector y entrada de aire Secadero No. 1 con ventilador

En las Figuras 22 y 23, para el sensor que se encuentra ubicado en el colector, los puntos de temperaturas máximos son de 24 °C aproximadamente siendo 36 °C menores que en el ensayo con ventilador apagado donde llegaban hasta los 60 °C. Esto evidencia el desperdicio de aire caliente si se encuentra el ventilador apagado en las horas de mayor radiación solar.

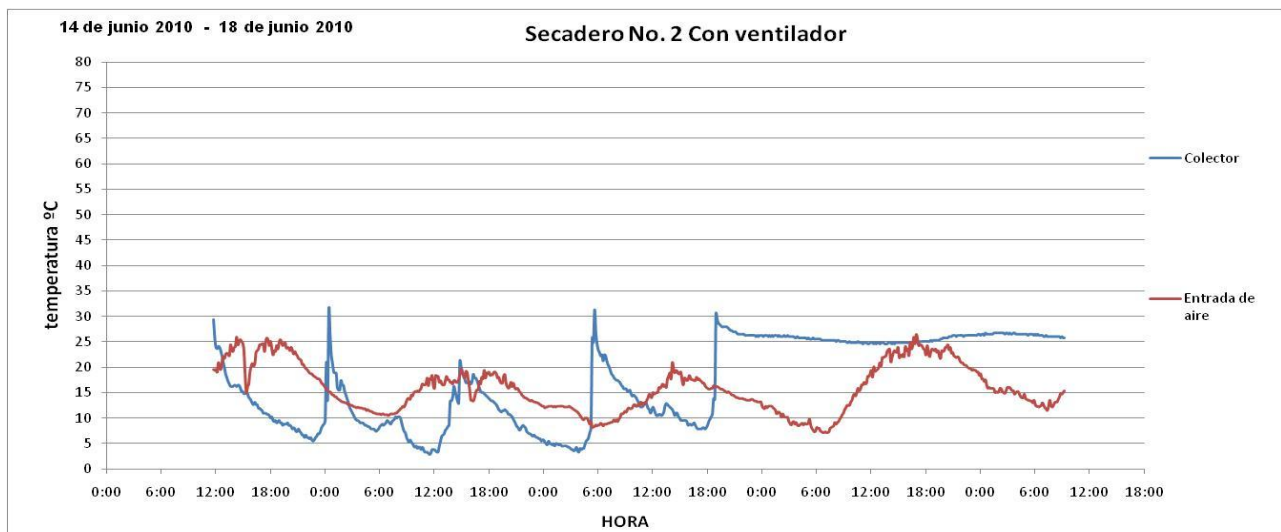


Figura 23. Colector y entrada de aire Secadero No. 2 con ventilador

El colector presenta la misma tendencia que en el ensayo con el ventilador apagado, en las horas que no hay radiación solar, el aire caliente que hay en el colector es evacuado por la cubierta del colector hacia el exterior. Pero siendo en la misma proporción de las temperaturas del aire que hay dentro del colector y no depende de las temperaturas que hay dentro de la cámara de secado, ya que este aire es evacuado por la salida de la cámara por efecto del ventilador.

Por lo anterior podemos concluir que controlando la velocidad del ventilador, dependiendo de las horas o las temperaturas de la cámara, se puede evitar pérdida de aire caliente a través de las zonas donde puede haber alta transferencia de calor.

Podemos decir que si se fija dos temperaturas de consigna, alta y baja para el sensor ubicado en la entrada de la cámara, o sea delante del ventilador se puede ordenar al ventilador modificar su velocidad así:

- La velocidad del ventilador debe ser la máxima, cuando el sensor sea igual o mayor que la temperatura de consigna alta.
- La velocidad del ventilador debe ser media, cuando el sensor detecte temperaturas menores de la consigna alta y mayores de la consigna baja.
- La velocidad del ventilador debe ser nula en el momento que el sensor detecte que las temperaturas son iguales o menores que la temperatura de consigna baja.

Esto permitirá que en momentos de alta temperatura, cuando haya aire con una temperatura aceptable para el secado, todo el aire caliente fluya por las bandejas con producto y sea utilizado sin desaprovechar su temperatura. Por el contrario, cuando haya temperaturas bajas se evitará enfriar con mayor rapidez la temperatura del producto y del aire que se encuentra en la zona de secado.

4.2 Proceso de secado

4.2.1 Tarjetas TurboTag®

En el proceso de secado la programación de las tarjetas TurboTag®, fue desarrollada en 2 etapas:

I Etapa: 16 de Agosto hasta 19 de Agosto de 2010

II Etapa: 19 de Agosto hasta 22 de Agosto de 2010

Las dos etapas se desarrollaron bajo la misma programación de las tarjetas, pero al finalizar la primera etapa hubo que abrir el secadero para revisar el producto y reconfigurar la toma de datos de las TurboTag®, por lo cual, hubo un lapso de tiempo prolongado, debido a esto no se realizó concatenación de datos, ya que habría un vacío de tiempo en la continuidad de los datos, y se ha decidido presentarlo como dos etapas de proceso.

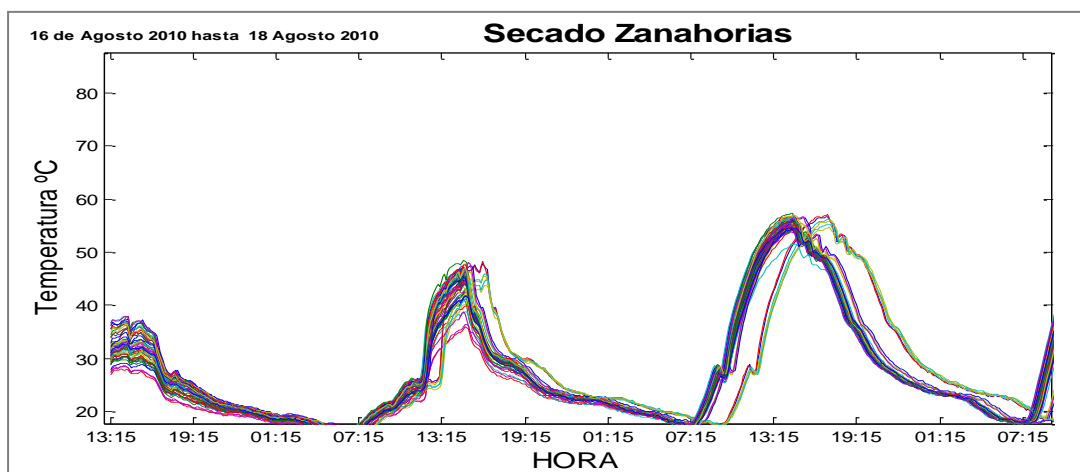


Figura 24. Temperatura Aire en Bandejas Proceso de Secado Zanahorias TurboTag® Etapa I

En las Figuras 24 y 25, se representa el comportamiento de las temperaturas del aire en las bandejas con producto.

Para el día 16 de Agosto Figura 24, se inició la lectura sobre las 13:15 con una temperatura repartida entre los 28 y 37 °C, lo cual es debido a que las temperaturas dentro del secadero no se encontraban homogenizadas; se puede observar claramente los días y noches representados en el grafico.

Las temperaturas promedio del medio ambiente, para los días de la Etapa I, fueron en continuo aumento, lo cual fue claramente registrado en las tarjetas TurboTag®, llegando alcanzar la mayor temperatura sobre los 56 °C, el día 18 de Agosto.

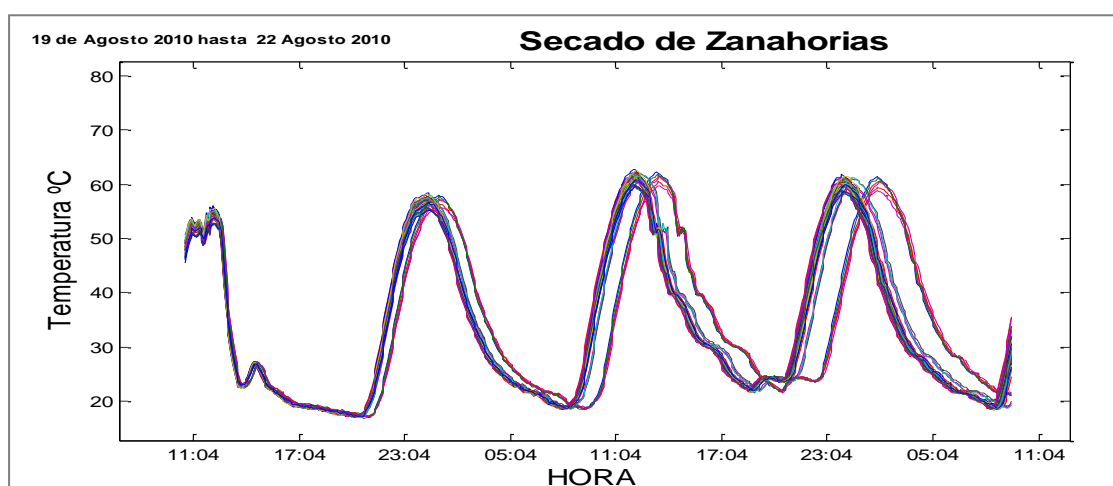


Figura 25. Temperatura Aire en Bandejas Proceso de Secado Zanahorias TurboTag® Etapa II

Para la etapa II de secado y lectura de las TurboTag®, el día 19 de agosto se presentaron precipitaciones sobre las 17:30 lo cual se evidencia en la curvas de la Figura 25. El resto de días se mantuvo una tendencia de temperaturas máximas sobre los 60 °C.

4.2.2 Sensirion™

En la Figura 26, están representadas las temperaturas de las diferentes zonas del secadero en todo el ciclo de secado.

El día 19 de agosto, en el momento que se presentaron las lluvias los Sensirion™ se vieron afectados al mojarse, presentando un error en la lectura de los datos, en la tercera curva desde las 17:30 hasta la 18:00 horas aproximadamente hay un vacío de datos, que son los registros perdidos para las Figuras 26 y 27.

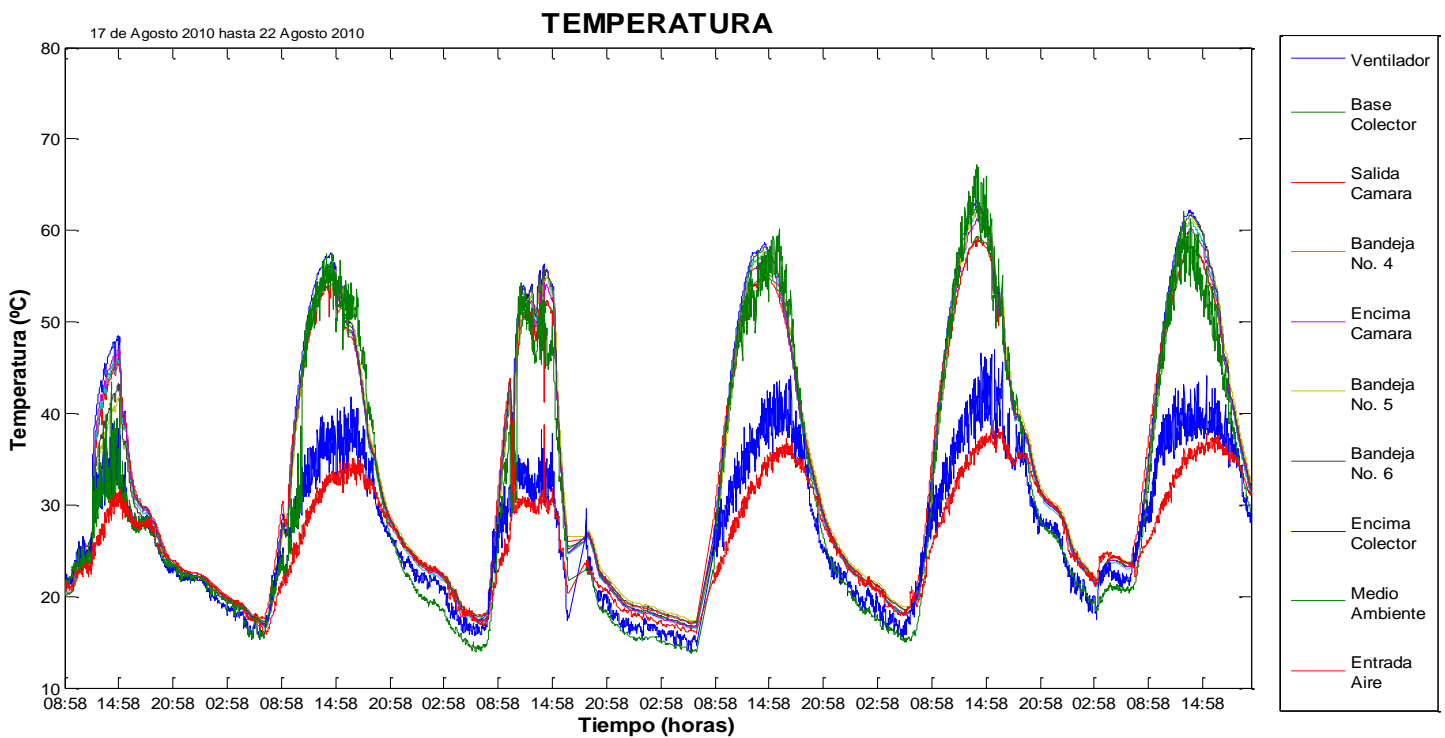


Figura 26. Temperatura del Aire en Secadero, Proceso de Secado Zanahorias Sensirion™

En la Figura 27, se representa la humedad del aire en las diferentes zonas del secadero, y asemeja congruentemente el comportamiento de la Humedad Relativa del medio ambiente en los días del proceso.

Las Humedades Relativas más altas claramente fueron en las horas de la noche, siendo sobre las 03:00 las horas donde se registraban cercanas al 100%. Esto nos indica que en los datos obtenidos influye más la variabilidad del %HR del medio ambiente, que la que se encuentra dentro del secadero.

En la salida de la cámara el aire se encuentra aún en un promedio de 50°C, que son expulsados al exterior. Es fundamental estudiar si este aire puede ser recirculado, aprovechando su temperatura, con el fin de aumentar el flujo de aire para secado.

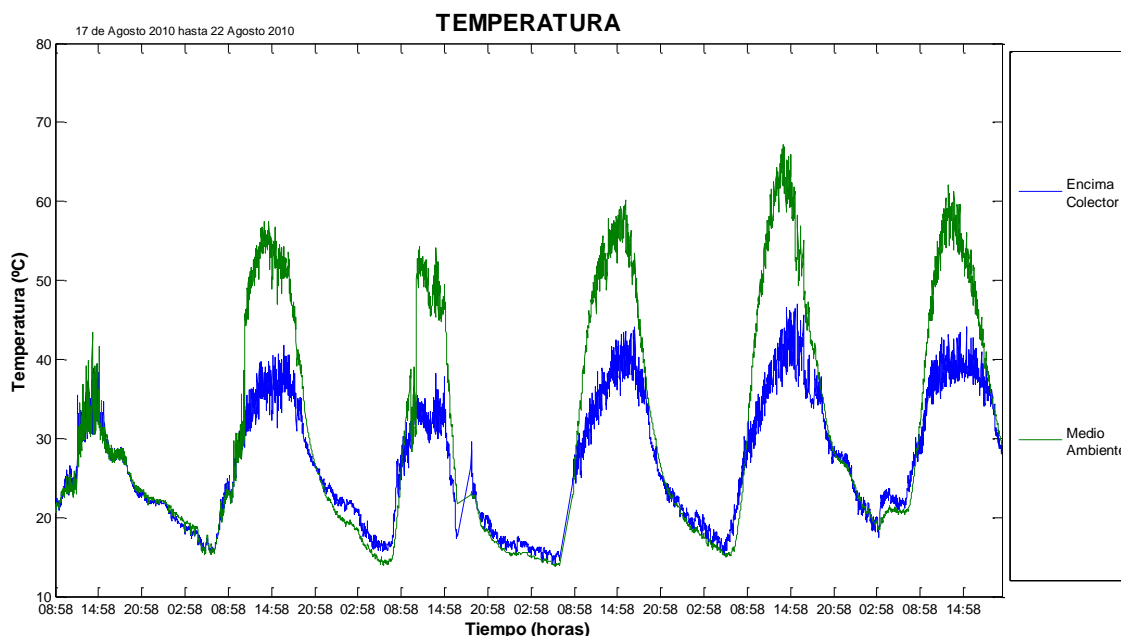


Figura 29. Comportamiento de la Temperatura en el Colector, Proceso de Zanahoria

En la Figura 30, se está representando el comportamiento de las temperaturas del aire del medio ambiente y la temperatura encima del colector. En las horas diurnas la temperatura del medio ambiente es aproximadamente 18 °C más alta que la de la superficie del colector, esto es debido a que la cubierta es opaca para las radiaciones solares que ha absorbido el colector.

En las horas nocturnas la temperatura de la cubierta es más baja sobre 2 °C aproximadamente, ya que la cubierta funciona como efecto invernadero, manteniendo un poco la temperatura del interior del colector. Sin embargo esto no es significativo, ya que desciende en la misma proporción que la temperatura del medio ambiente. Es posible evitar la velocidad de este descenso ajustando la velocidad del ventilador, permitiendo mantener por más tiempo el calor en el colector.

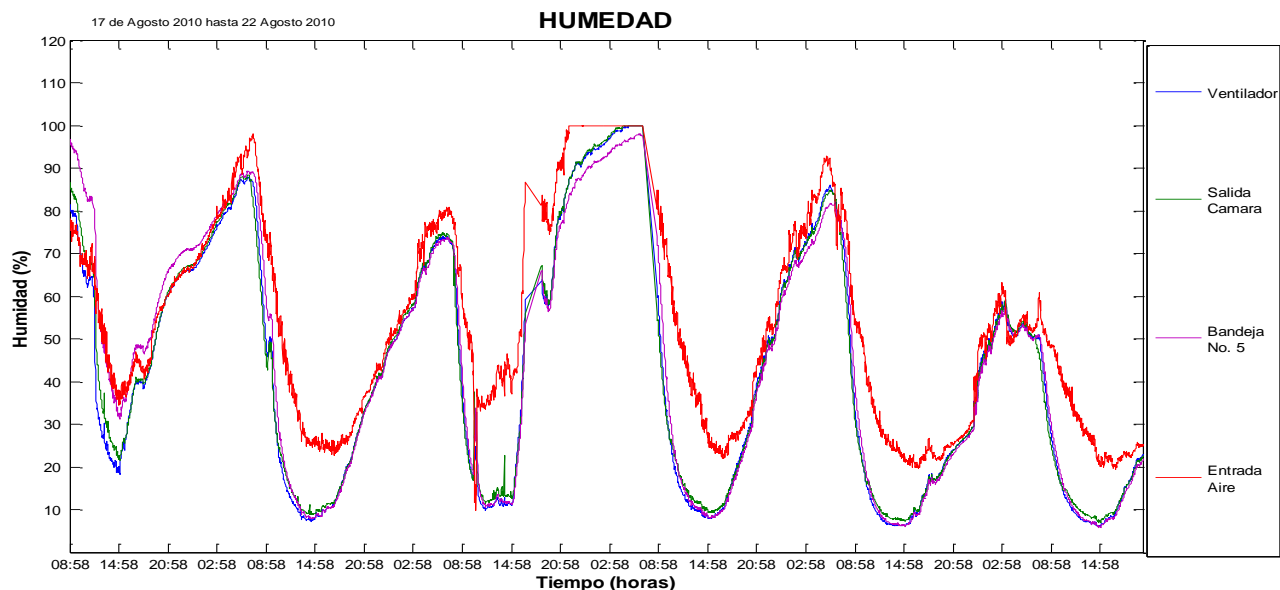


Figura 30. Comportamiento de la Humedad en el Secadero, Proceso de Zanahoria

En la Figura 29, podemos apreciar que la humedad en la entrada de aire es muy alta, después de pasar por el colector esta disminuye.

Ya dentro de la cámara de secado el aire aumenta su humedad conforme avanza por las bandejas de secado, ya que el aire está absorbiendo la humedad del producto. Este aumento no es tan significativo durante el proceso, ya que en los momentos de mayor calor no es muy acusado.

En la noche y teniendo el ventilador encendido, el aire húmedo y frío está fluyendo al producto, y puede generar costra en el producto, afectando el tiempo de secado y el aspecto del producto; con el ventilador apagado se puede disminuir el flujo de aire que entra al secadero.

4.3 Producto

El día 19 de agosto fue inspeccionado el producto, con un análisis táctil y visual (Figura 31). Se determinó que la zanahoria aún no había alcanzado la humedad deseada, pero visualmente se detectó la generación de costra y las orillas que tenían cáscara se enroscaron sobre sí mismas. Estas zonas generaron mayor grosor, evitando la salida de la humedad.

Si no se hubieran generado estos dos efectos, la humedad del producto hubiera alcanzado el rango deseado, sin tener que recurrir a unos días más de secado.



Figura 31. Zanahoria en proceso, 19 de agosto 2010

Para el inicio del proceso, se procesaron 18 kg de Zanahoria fresca, después del corte se obtuvieron 12 kg de Zanahoria cortada y 6 kg de desperdicio (cáscara, trozos de zanahoria que no cumplían medida y puntas de zanahoria). Para el presente ensayo no es preciso calcular el rendimiento del secado de zanahoria, ya que al no cumplir la medida estándar del ensayo, se está despreciando una cantidad importante de producto.

Tabla 9. Humedad Final Zanahoria

| Bandeja | Producto Cortado (g) | Producto Seco (g) | Pérdida de peso | Humedad Final |
|----------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|
| 1 | 1.208,0 | 154,2 | 87% | 7,7% |
| 2 | 1.211,6 | 154,2 | 87% | 8,0% |
| 3 | 1.207,6 | 153,8 | 87% | 7,8% |
| 4 | 1.212,4 | 155,4 | 87% | 7,9% |
| 5 | 1.219,6 | 160,0 | 87% | 7,8% |
| 6 | 1.202,6 | 148,6 | 88% | 8,5% |
| 7 | 1.212,2 | 159,6 | 87% | 8,1% |
| 8 | 1.209,6 | 156,0 | 87% | 7,9% |
| 9 | 1.207,8 | 155,8 | 87% | 8,2% |
| 10 | 1.202,8 | 156,4 | 87% | 8,1% |

En la tabla 9 se encuentra el peso inicial y final de producto por bandeja, en el proceso hubo un 87 % de pérdida de peso durante el proceso de secado, con una humedad final del 8%.

Con lo anterior podemos decir que por cada 1000g de producto que entre en el secadero se obtendrá 87 g de zanahoria seca, con una humedad del 8%.

La humedad deseada al inicio del ensayo era del 14-16 %. Es necesario adaptar un dispositivo de control de humedad del producto, o a través del seguimiento continuo de la pérdida de peso, para obtener producto con la humedad deseada. Cuanto más baja sea la humedad del producto, menor es el peso del producto obtenido, aumentando los costos del proceso.

CONCLUSIONES

1. El proceso de secado de zanahoria utilizando energía solar, es una opción viable en zonas con características ambientales de elevada radiación solar, siendo un proceso de bajo costo operacional.
2. La temperatura y humedad del aire en un proceso de secado con energía solar, son variables dependientes a las circunstancias del medio ambiente, presentadas durante el día y la noche, por lo cual es necesario desarrollar un sistema de control en el proceso de secado.
3. En el secado con energía solar, el aire de salida de proceso puede contener condiciones de temperatura y humedad aptas para realizar recirculación y mejorar la tasa de secado.
4. En este tipo de secador según las condiciones climáticas, es necesario manejar varias velocidades del ventilador, evitando cambios bruscos en la humedad y temperatura del aire, que puedan afectar el producto.

RECOMENDACIONES

1. **Compuerta de recirculación de aire;** en la zona de salida de aire realizar un montaje de una compuerta se puede permite según graduación la recirculación total, parcial o nula del aire utilizado en el proceso, ya que en función de la evolución del ciclo de secado la proporción de aire recirculado se puede regular, con el fin de aprovechar la temperatura del aire saliente del proceso
2. **Control de la velocidad del ventilador;** utilizando dos temperaturas de consigna, una alta y una baja, regular la velocidad del ventilador en 'alta', 'media' o 'nula', con el fin de prolongar la temperatura y humedad del aire en condiciones óptimas del secado.
3. Las variables tanto las relativas al aire, como las relativas al producto, descritas en el resultado del presente trabajo, pueden ser tenidas en cuenta en la realización del proyecto como factores primarios de evaluación, constituyendo las variables de entrada para los distintos modelos que permitirán la estimación en futuros trabajos de parámetros complejos del proceso, como variabilidad de la velocidad de secado o evolución del contenido de humedad del alimento a lo largo del ciclo de secado.

BIBLIOGRAFÍA

- Augustus Leon, M., Kumar, S., & Bhattacharya, S. C. (2002). A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(4), 367-393.
- Ayensu, A. (1997). Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, 59(4-6), 121-126.
- Baloch, K.A. Buckle and R.A. Edwards (1977), Effect of processing variables on the quality of dehydrated carrot I. Leaching losses and carotenoid content. *Journal of Food Technology* **12** (1977), pp. 285–293.
- Barreiro, P, Diezma, B., Correa, E.C.; Arranz, F.J.; Juliá, E., Bonzon, J., Robla, J.I, Ruiz-García, J.L., Escalona, O., García-Herrero, J. (2009) Estimación del secado de madera empleando sensores de bajo coste. V Congreso Nacional y II Congreso Ibérico Agroingeniería. Lugo. 28-30 septiembre.
- Chen, H., Hernandez, C. E., & Huang, T. (2005). A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. *Solar Energy*, 78(1), 97-103.
- Dissa, A. O., Bathiebo, J., Kam, S., Savadogo, P. W., Desmorieux, H., & Koulidiati, J. (2009). Modelling and experimental validation of thin layer indirect solar drying of mango slices. *Renewable Energy*, 34(4), 1000-1008.
- Doymaz, I. (2004). aire por convección características de secado de zanahorias en capa fina. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 359-364.
- El-Aouar, Â. A., Azoubel, P. M., & Murr, F. E. X. (2003). Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (carica papaya L.). *Journal of Food Engineering*, 59(1), 85-91.
- Fito, P., Andrés-Grau A., Barat, J., Albors, A. (2001) Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente. Universidad Politécnica de Valencia. (ISBN 84-9705-025-8)
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1-30.

Hawlder, M. N. A.; Perera, Conrad O.; Tian, Min; Yeo, K. L. (2006). Drying of Guava and Papaya: Impact of Different Drying Methods. Taylor & Francis, 24, 77.

Imre, L. (1997) Industrial Drying of Foods (ed. C.G.J. Baker) 210-239

Jiménez. H. (2010) Utilización de un Secadero Solar en el Proceso de Deshidratación de Papaya (*Carica papaya* L.) EN III Congreso de Estudiantes Universitarios de Ciencia, Tecnología e Ingeniería Agronómica. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. 205-208

Karim, M. A., & Hawlder, M. N. A. (2005). Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. International Journal of Heat and Mass Transfer, 48(23-24), 4914-4925.

Kaya, A., Aydın, O., & Demirtaş, C. (2009). Experimental and theoretical analysis of drying carrots. *Desalination*, 237(1-3), 285-295.

Koca, N., Burdurlu, H. S., & Karadeniz, F. (2007). Kinetics of colour changes in dehydrated carrots. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 449-455.

Liu, J. R., Jeon, J. H., Yang, S. G., Lee, H. S., Song, N. H., & Jeong, W. J. (1992). Dry type of carrot (*daucus carota* L.) artificial seeds. *Scientia Horticulturae*, 51(1-2), 1-11.

Prakash, S., Jha, S. K., & Datta, N. (2004). Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers. *Journal of Food Engineering*, 62(3), 305-313.

Sagar et al., 1997. V.R. Sagar, S.B. Maini, R. Kumar and N. Pal, Studies on sun drying of carrots. *Vegetable Science* 24 1 (1997), pp. 61-66

Sharma, A., Chen, C. R., & Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1185-1210.

Wang, J., & Xi, Y. S. (2005). Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process. *Journal of Food Engineering*, 68(4), 505-511.

Zielinska, M., & Markowski, M. (2010). Air drying characteristics and moisture diffusivity of carrots. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(2), 212-218.

Paginas web

<http://www.turbotag.com/products/specialty/coldchain/turbotag.html>

http://www.tutiempo.net/clima/Madrid_Barajas/06-2010/82210.htm